

UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA AUXÍLIO DO ENSINO DE ENGENHARIA E APOIO A PROJETOS DE TCC

Cesareo de La Rosa Siqueira – cesareo@esss.com.br
Universidade São Judas Tadeu, Depto. Engenharia Mecânica & ESSS
Rua Taquari, 546 – Mooca
03166-000 – São Paulo – SP

Carlos Eduardo Fontes – carlos.fontes@esss.com.br
Instituto ESSS de Ensino Pesquisa e Desenvolvimento - iESSS
Av. Presidente Vargas, 3131, 12º andar - sala 1203 - Centro
20210-031 – Rio de Janeiro - RJ

Resumo: O emprego de ferramentas de CAE (Computer Aided Engineering) tem se tornado cada vez mais frequente nos mais variados departamentos de Pesquisa e Desenvolvimento das principais empresas de Engenharia do país. Como se trata de uma ferramenta que proporciona uma maior compreensão dos fenômenos físicos envolvidos nos projetos, torna-se de fundamental importância que a metodologia de ensino dos cursos de engenharia a empregue já nos cursos de graduação. Disciplinas como Transferência de Calor, Mecânica dos Fluidos, Mecânica dos Sólidos, Elementos de Máquinas, Máquinas de Fluxo entre outras podem ser enriquecidas com o emprego destas ferramentas de simulação, ajudando na visualização dos fenômenos e consolidação dos conceitos teóricos fundamentais. Este enfoque acaba sendo complementado pelo TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) onde a interdisciplinaridade é reforçada nas competições consagradas entre os formandos de graduação como BAJA, AERODESIGN entre outras. O presente trabalho trata de apresentar a metodologia de emprego do CAE nos dois últimos anos do curso de Engenharia Mecânica na Universidade São Judas Tadeu, do Grupo Anima, de forma a mostrar como o emprego da ferramenta usada em laboratório como complemento das disciplinas da graduação leva a um amadurecimento para a execução dos projetos de TCC. Os trabalhos empregam o uso das técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics) e FEA (Finite Element Analysis). Versões estudantis gratuitas do programa utilizado, além de propiciar um início amplo aos estudos, ajudam a amadurecer os conceitos complementando o trabalho realizado pelo professor em sala de aula.

Palavras-chave: Ensino. Engenharia. Simulação Numérica.

1 INTRODUÇÃO

Diversas instituições de ensino no Brasil têm feito um grande esforço no sentido de modernizar o currículo de ensino de engenharia, buscando garantir que seus alunos saiam com uma capacidade crítica de alto nível, tendo experimentado o máximo possível de situações que os aproximem da realidade da indústria que ele irá suportar, seja na sua operação de dia-a-dia, seja nas atividades de inovação que, hoje, são parte indissolúvel da atividade de um

engenheiro. A utilização de Laboratórios Virtuais, baseados em Tecnologias CAE (*Computer Aided Engineering*), é a mais poderosa ferramenta hoje existente que pode ajudar neste objetivo.

Além disto, o emprego das tecnologias de CAE é uma realidade em muitas empresas de engenharia do País, de tal forma que os mais variados departamentos de Pesquisa e Desenvolvimento consideram imprescindível o emprego de tais técnicas de forma a complementar os ensaios e experimentos de laboratório e proporcionar um melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos.

Dentro deste contexto, é de fundamental importância que a metodologia de ensino dos cursos de engenharia passe a incorporar estas técnicas já nos cursos de graduação. O processo de aprendizado de disciplinas fundamentais dos cursos de engenharia tais como Transferência de Calor, Mecânica dos Fluidos, Mecânica dos Sólidos, Elementos de Máquinas, Máquinas de Fluxo, Sistemas Térmicos, entre outros, é fortemente enriquecido pela experiência de visualização de fenômenos proporcionada pelas ferramentas de CAE. O objetivo deste presente trabalho é mostrar a experiência e o sucesso obtidos na melhoria do aprendizado de engenharia, com base no emprego de ferramentas de CAE, nos três últimos anos de cursos de graduação do curso de Engenharia Mecânica na Universidade São Judas Tadeu, o Grupo ANIMA.

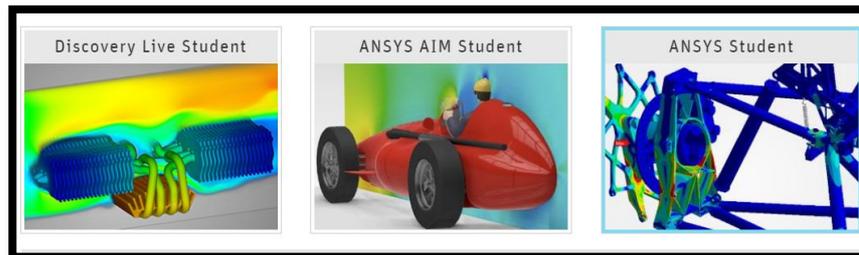
2 METODOLOGIA PARA ADOÇÃO DA TECNOLOGIA DE CAE NO CURSO DE GRADUAÇÃO

A metodologia de adoção da tecnologia de CAE apresentada neste trabalho se refere ao resultado da experiência feita, ao longo dos três últimos anos, no curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Judas Tadeu (Grupo ANIMA). A tecnologia CAE eleita para a experiência foi a fornecida pela suíte de softwares comerciais da ANSYS®, desenvolvido pela empresa ANSYS Inc. (www.ansys.com). As aulas do curso de engenharia mecânica são ministradas em 06 anos no regime de curso anual. Desde o início do desenvolvimento e implementação da metodologia, os alunos passaram a ser, então, expostos no 5º e 6º ano do referido às tecnologias de Simulação Fluidodinâmica (CFD) e de Análise Estrutural por Elementos Finitos (FEA) no contexto das seguintes disciplinas:

- Máquinas de Fluxo;
- Vibrações e Tópicos de Mecânica Aplicada;
- Tópicos de Engenharia Mecânica.

No 6º e último ano do curso, quando o aluno desenvolve o trabalho de conclusão de curso (TCC), o mesmo tem a possibilidade de desenvolver parte ou o trabalho completo de TCC na ferramenta CAE adotada que, inclusive, oferece uma versão estudantil gratuita. A Universidade possui licenças de ensino em seus laboratórios para a aplicação das aulas. A combinação destes dois tipos de licenciamentos foi fundamental para a implantação segura e completa do Laboratório Virtual e para o desenvolvimento dos TCCs. A “Figura 1” a seguir apresenta as ferramentas disponíveis para os alunos de forma gratuita.

Figura 1 – Ferramentas CAE gratuitas disponíveis para os alunos.



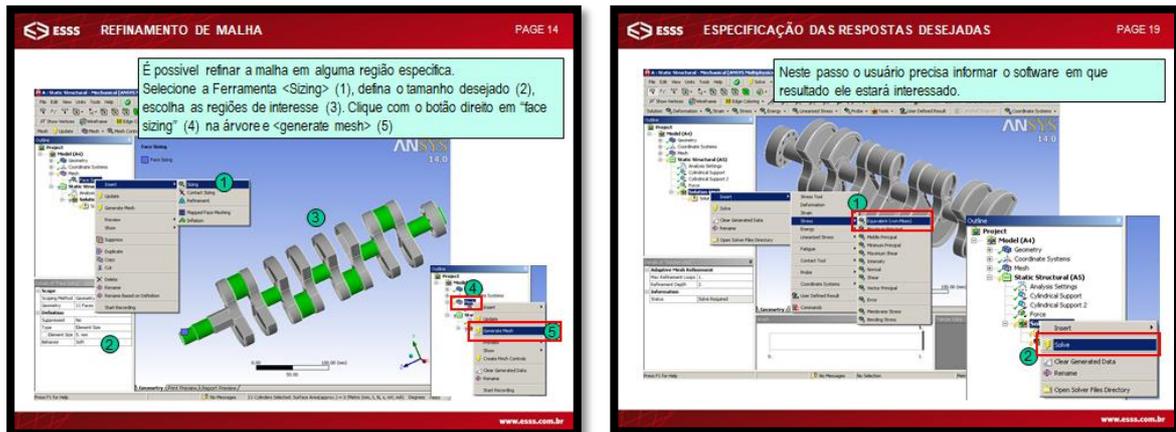
2.1 Material inicial de trabalho em sala de aula

O primeiro contato com a ferramenta CAE começa na disciplina Vibrações e Tópicos de Mecânica Aplicada, em que, semanalmente, os alunos fazem exercícios tutoriais passo a passo. O Laboratório Virtual se baseia fortemente na habilidade da ferramenta didática em permitir que os alunos possam facilmente exercitar variações dos exercícios teóricos e práticos (laboratório físico tradicional) ministrados em sala de aula, desenvolvendo um sentimento físico mais completo de engenharia. Este enriquecimento de conhecimento e “*feeling*” físico só é viável se estas atividades puderem ser complementarmente executadas nos computadores pessoais dos alunos, em forma de estudos dirigidos. Com base neste princípio de Laboratório Virtual, uma coleção de exercícios de CFD e FEA, envolvendo vários tipos de análises de engenharia presentes no dia a dia de projetos industriais é semanalmente oferecida aos alunos. Esta coleção de exercícios é cuidadosamente selecionada pelos professores responsáveis pelas disciplinas, de forma a permitir o máximo desenvolvimento da versatilidade e sensibilidade de engenharia aos alunos. Alguns exemplos desta coleção de exercícios em que se baseia o método usado de Laboratório Virtual são:

- Análise Estática (FEA); Análise Modal (FEA); Análise Térmica (FEA);
- Análise de Interação Fluido-Estrutura (CFD/FEA);
- Escoamento Externo - perfil NACA (CFD);
- Análise de Fadiga (FEA);
- Turbo demo (Análise CFD em Bomba centrífuga);
- CHT – Transferência de Calor Conjugada Fluido-Estrutura (CFD);
- Revisão de Vibrações (FEA);
- CHLADNI Pattern (modos de vibrar de uma placa plana) - FEA;
- Sistema Massa- Mola (FEA); Sistema Massa- Mola – Amortecedor (FEA);
- Placa sobre Amortecedores (FEA); Vibração de Livre Placa Apoiada (FEA);
- Sistemas Massa-Mola com 2 graus de liberdade (FEA);
- Análise Harmônica de um Virabrequim (FEA).

A “Figura 2” abaixo mostra um exemplo de como os tutoriais passo a passo são fornecidos aos alunos em relação aos exercícios acima mencionados. Além dos tópicos acima existem exercícios complementares para fundamentação e aprofundamento. Estes exercícios são feitos semanalmente no laboratório da Universidade, que dispõe das licenças de ensino, com as quais os alunos podem trabalhar individualmente ou em duplas. As aulas sempre buscam explorar os detalhes numéricos importantes, destacando vantagens e cuidados que as tecnologias virtuais trazem e demandam e, principalmente, explorar o desenvolvimento da sensibilidade de engenharia dos alunos.

Figura 2 – Detalhe do tutorial passo a passo para o 1º exercício de Análise Estática Linear de um Virabrequim, refinamento da malha e pós-processamento de resultados.



2.2 Atividades de uso de CAE nos Projetos de TCC

Após a experiência inicial com o Laboratório Virtual, durante o 5º ano do curso de Engenharia Mecânica, conforme relatado no item 2.1, os alunos são considerados preparados para realizar vários tipos de análises de CFD e FEA para aprimorar sua capacitação para lidar com os possíveis desafios que a vida de engenheiro lhes trará. O primeiro grande teste desta premissa é o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), a partir do 6º ano do curso. Nos seus TCCs, caso queiram, os alunos terão a possibilidade de modelar, no todo ou em parte, os objetos de suas análises, com o apoio do corpo docente envolvido na experiência.

A “Tabela 1” dada a seguir ilustra a evolução do número de trabalhos de CFD e FEA nos últimos 03 anos da disciplina TENGMEC. Nota-se um paulatino crescimento do número de grupos usando em seus projetos as técnicas de CFD, ainda que o uso de FEA ainda seja mais popular e preferido pela maioria dos formandos em Engenharia Mecânica.

Tabela 1 – Evolução dos temas de TCC (CFD ou FEA) nos últimos 03 anos para os alunos do curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Judas Tadeu (Grupo ANIMA)

2015	10 trabalhos	FEA (70%), CFD (30%)
2016	12 trabalhos	FEA (67%), CFD (33%)
2017	14 trabalhos	FEA (64%), CFD (36%)

Como parte da disciplina de TCC, em apoio à execução dos trabalhos, é fornecido, no 2º semestre da disciplina, um cronograma de atendimento dos projetos de TCC. A “Figura 3” a seguir ilustra este cronograma. Todos os grupos, durante o processo de construção dos modelos e revisão da modelagem escolhida, têm o suporte técnico de empresa especializada responsável pelo suporte técnico no uso da ferramenta CAE na Universidade São Judas Tadeu. O professor fornece as orientações principais na revisão do modelo e o suporte técnico ajuda a refinar os últimos detalhes. Os alunos gostam muito da experiência de serem tratados como jovens engenheiros reais, carregando a responsabilidade de desenvolver um projeto e buscar eventuais apoios em consultores (professores) ou em suporte técnico das ferramentas usadas. A poderosa combinação de responsabilidade, criatividade e simulação os fazem se desenvolverem rapidamente.

Figura 3 – Exemplo de cronograma de trabalho com os alunos para execução dos modelos no software CAE para os projetos de TCC.

DATA	Atividades
AGOSTO	
18.08	Apresentação das Atividades do Projeto
25.08	Assessoria/Dúvidas/Finais para Escolha do Tema a ser usado em parte ou no todo do TCC para modelagem do software ANSYS, para CFD ou FEA
SETEMBRO	
01.09	Apresentação do Tema Final (10 min por grupo)
08.09	FERIADO
15.09	Apresentação MODELOS
22.09	Apresentação MODELOS
29.09	Apresentação MODELOS
OUTUBRO	
06.10	Resultados preliminares
13.10	FERIADO
20.10	Resultados preliminares
27.10	Resultados preliminares
NOVEMBRO	
03.11	FERIADO
10.11	PROVAS SEMESTRAIS
17.11	Entrega Relatório PowerPoint + Modelos CAD + Ansys

2.3 Destaques de projetos de TCC usando o programa CAE

Além da maturidade dos alunos envolvidos, observada pelos participantes do experimento, ao longo destes últimos 03 anos também foi possível notar-se um aumento do grau de amadurecimento dos temas de projeto final escolhidos. Este fenômeno se manifesta de várias formas, mas notadamente naqueles em que há a possibilidade de construção de protótipos físicos que podem corroborar, ao menos qualitativamente, os resultados obtidos na plataforma de CAE utilizada. Neste sentido, os alunos buscam verificar, nos casos de FEA, as deformações obtidas em campo e comparadas com o modelo computacional, além das distorções angulares em função do carregamento que o equipamento ou que as peças sofrem. Não é trivial observar o surgimento de uma geração de engenheiros que combinam habilidades de simulação, observação, medição controlada e responsável, validação de resultados de simulação e inferência de soluções para os problemas propostos.

Para os casos de CFD há uma dificuldade maior para a validação dos projetos devido ao custo e complexidade dos mesmos no tocante à construção de protótipos físicos. Neste sentido, a observação qualitativa de determinado fenômeno (ocorrência de recirculação, ajuda na estimativa da queda de pressão e como poderia ser melhorada, observação de zonas de turbulência) acaba sendo o caminho adotado. Não obstante, tivemos gratas surpresas quando algum aluno ou grupo, graças às eventuais oportunidades que têm em seus estágios em alguma empresa, ou simplesmente através de contatos pessoais com profissionais da indústria, conseguem ir mais longe e validar os projetos em instalações mais completas, confirmando a validade da experiência numérica e a pertinência dos resultados.

3 CASOS DE SUCESSO DO EXPERIMENTO NA UNIVERSIDADE

Um caso de destaque na área de CFD é o exemplo da bomba de sangue de neonatos, que passamos a detalhar no tópico a seguir, realizado no ano de 2016. O ponto de partida para este complexo trabalho foi o tutorial Turbo demo (Análise CFD em Bomba centrífuga), citado no item 2.1. Neste TCC foi construído um protótipo físico para validar os resultados obtidos com o software CAE. O resultado previsto com o CAE encontrou validação no modelo experimental testado em bancada no Instituto Dante Pazzanezzi (Nery et al). Na área de FEA,

destacamos o trabalho de 2017 sobre a bicicleta *Hubless* (Sbarro, Franco), no qual foi feita uma otimização usando o software CAE e posterior construção do protótipo.

3.1 Projeto de TCC – Bomba de Sangue para Neonatos

O objetivo deste trabalho foi definir a geometria da aleta de uma bomba de sangue centrífuga paracorpórea para aplicação em neonatos e para bebês de até 10 Kg. Durante o seu desenvolvimento foi utilizado um modelo de aleta baseado na tese de doutorado da Dra. Juliana Leme de 2015 (Nery et al). Estas bombas de sangue foram modeladas tridimensionalmente através de diversos *softwares* de CAD (*Computer Aided Design*). Estes modelos foram então preparados e adaptados para simulação no *software* de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) do pacote de CAE disponível para uso (ANSYS CFX®) para avaliação do desempenho hidrodinâmico. Os rotores foram confeccionados em uma impressora 3D e os protótipos foram montados para realização dos testes *In Vitro*.

Curvas características foram geradas mostrando pressão e fluxo para diferentes rotações, comparando os dois protótipos. Em seguida, os dados obtidos através da simulação e os dados obtidos através testes *In Vitro* foram comparados.

A “Figura 4” dada a seguir mostra o modelo em CAD do rotor que foi utilizado para a simulação de CFD e posterior comparação com os casos experimentais de bancada. Após a inclusão do caracol (ou voluta) a geometria foi transferida para o gerador de malhas do software CAE. Já a “Figura 5” mostra a malha computacional e detalhes junto à parede da bomba, fundamental para a boa discretização dos efeitos junto à parede do corpo.

Figura 4 – Rotor de 4 (quatro) aletas simulado em CFD.

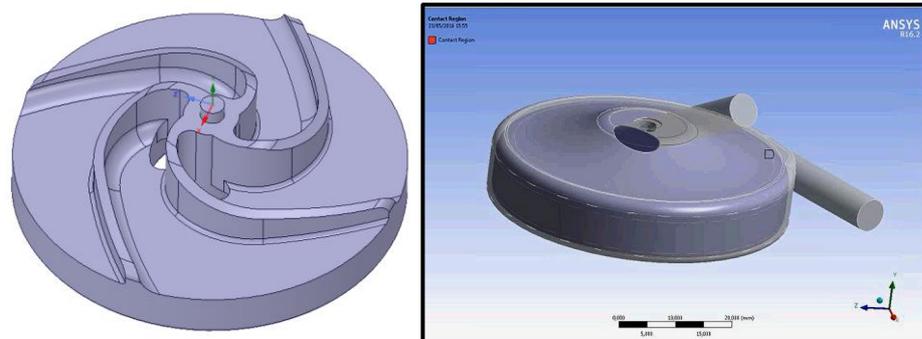
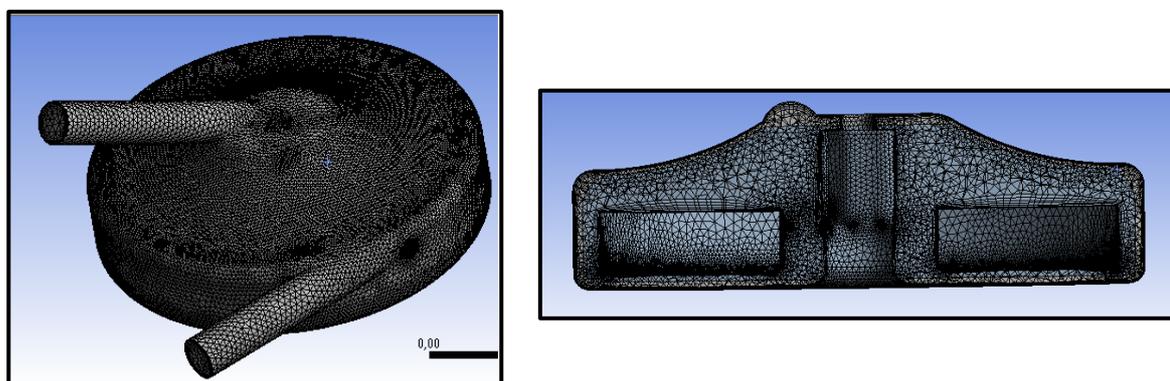


Figura 5 – Malha computacional para o estudo da Bomba de Sangue e detalhes internos.



A “Figura 6” mostra as linhas de corrente do escoamento para o rotor de quatro aletas. A “Figura 7” mostra os vetores velocidade em um plano médio da bomba. Já a “Figura 8” mostra a validação dos resultados experimentais e os resultados numéricos, através da

comparação das curvas características do rotor (curva de altura manométrica x vazão, rotação constante).

Figura 6 – Linhas de corrente do escoamento para o Rotor

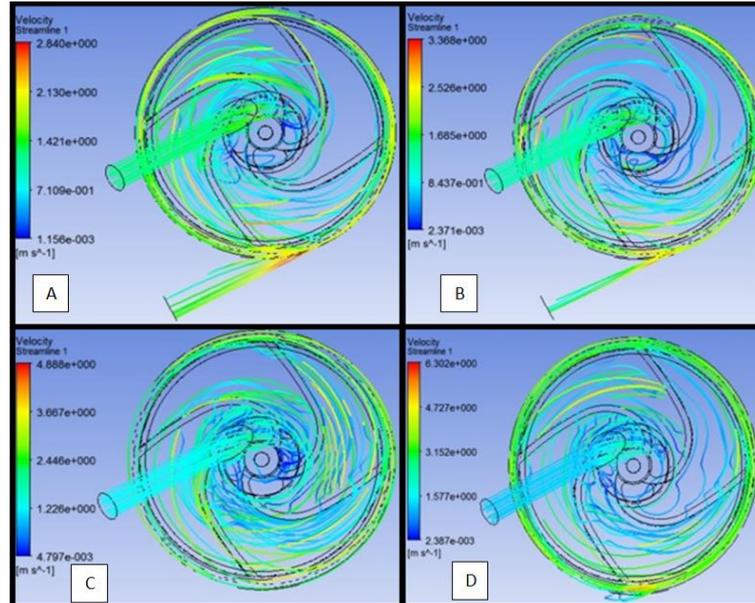


Figura 7 – Vetores velocidade em um plano diametral.

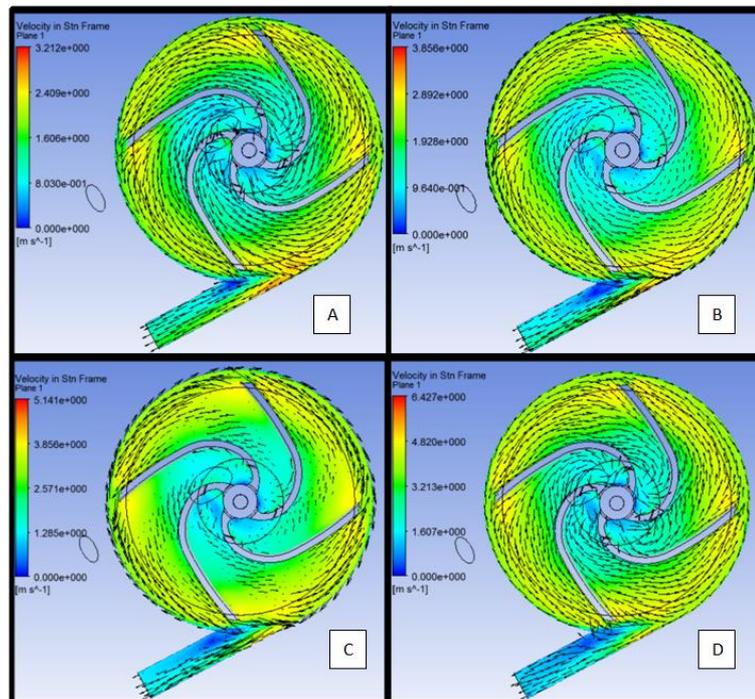
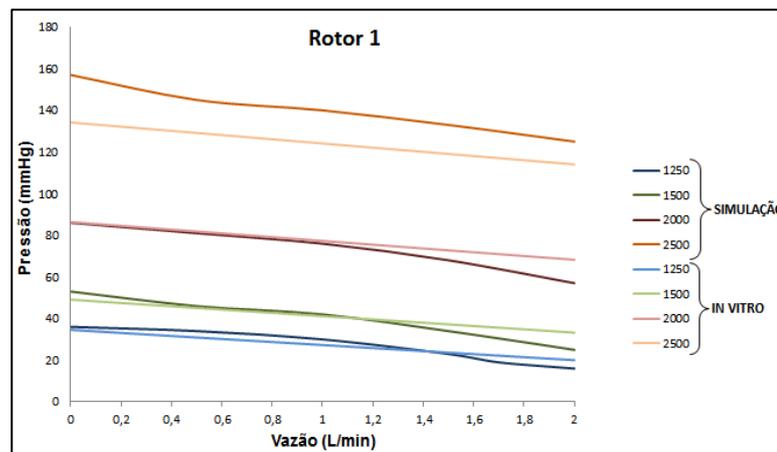


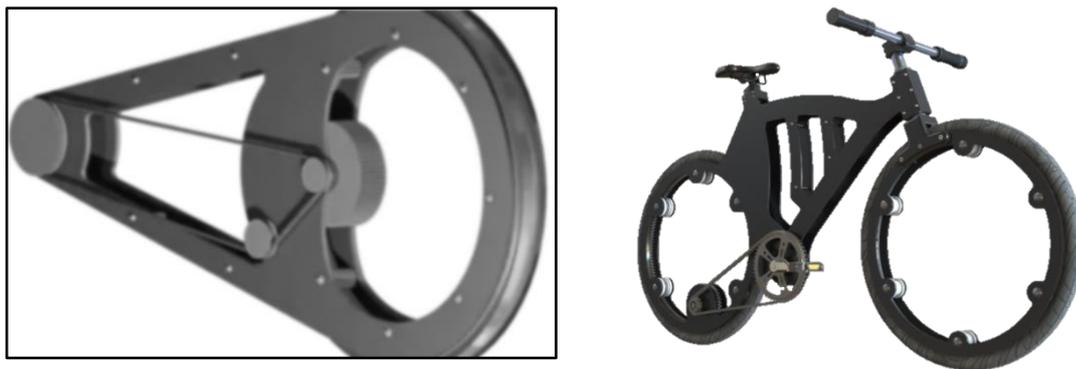
Figura 8 – Curvas características. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais.



3.2 Projeto de TCC – Bicicleta Hubless

Conforme pode ser visto na “Figura 9”, este conceito criado pelo Engenheiro Italiano Franco Sbarro (Sbarro, Franco) foi apresentado pela primeira vez no salão de automóveis de Genebra em 1989. Visava silenciar o sistema de transmissão, e atrair com seu design fora do padrão.

Figura 9 – Conceito de Franco Sbarro para bicicleta hubless.



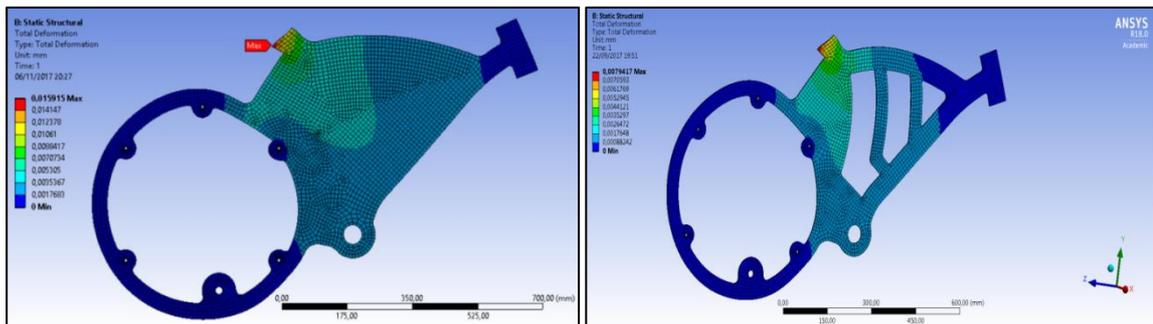
Entre as vantagens do sistema está a diminuição do peso e melhor posicionamento do centro de gravidade (mais baixo), além de proporcionar melhor dirigibilidade. Entre as dificuldades pode-se enumerar a dificuldade de fabricação e aumento do custo e a exposição os elementos mecânicos. O programa CAE utilizado pelos alunos ajudou a esculpir o quadro da bicicleta, possibilitando que os mesmos pudessem conhecer conceitos de otimização em análises estruturais.

A “Figura 10” mostra o protótipo construído pelos alunos após os resultados das simulações. Destaque-se o impacto do uso da tecnologia de otimização topológica, tão demandada atualmente no mercado de engenharia, à qual os alunos foram expostos e da qual se tornaram usuários e conhecedores. Pode-se observar, a partir da análise da “Figura 11” e “Figura 12”, como são os campos de deformação da estrutura antes e depois da otimização topológica.

Figura 10 – Protótipo construído pelos alunos com a ajuda da simulação CAE e otimização topológica.



Figura 11 – Deformação total do quadro da bicicleta antes (esquerda) e após (direita) o processo de otimização.



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contribuição principal deste artigo reside no fato de apontar a viabilidade de implementação massiva das tecnologias CAE nas Escolas de Engenharia do país, enriquecendo não só o currículo, como também permitindo um aumento da sensibilidade física dos alunos de engenharia, capacitando-os para desafios reais e modernos. Além da atuação na graduação, o grupo de pesquisa está agora acompanhando a evolução dos grupos de competição da instituição de ensino (Baja, Aerodesign, outros) e esperamos ter notícias interessantes por ocasião dos próximos eventos COBENGE. Além disto, ainda este ano, outra unidade do grupo passará a usar concretamente os resultados e diretrizes oriundas desta experiência.

Finalmente, cabe destacar que há ainda muito que fazer dentro da própria Universidade, incluindo o engajamento de mais profissionais de ensino nestas atividades de Laboratório Virtual e a escolha criteriosa e a participação ativa de bons parceiros tecnológicos de projeto.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio de nossas instituições Universidade São Judas Tadeu e iESSS pelo incentivo e apoio recebido para a divulgação desta experiência com nossa comunidade de engenharia.

REFERÊNCIAS

Nery, B., Mezzalira, Andrade, G., Cruz, N., Henrique, W. **Análise da Geometria da Aleta de uma Bomba de Sangue Centrífuga Paracorpórea para Neonatos através de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)**. Universidade São Judas Tadeu, Relatório de TCC, 101 páginas. 2016.

Internet:

Sbarro, Franco. **Citação de referências**

http://sbarro.phcalvet.fr/technique/roue_orbitale/roue_orbitalegb.html

EMPLOYMENT OF NUMERICAL SIMULATION AS A TOOL TO SUPPORT ENGINEERING TEACHING AND FINAL GRADUATION PROJECTS

Abstract: *The employment of CAE (Computer Aided Engineering) has become very popular in the research and development engineering departments all over the country. As a tool that provides a better understanding of the physical phenomena involved in the projects, CAE gains a fundamental relevance to be part of engineering teaching methodology in the early stages of the graduation course. Subjects such as Heat Transfer and Mass Flow, Fluid Mechanics, Solid Mechanics, Machine Elements, Turbomachinery and others can be enhanced with the employment of simulation tools, supporting visualization of the phenomena involved and consolidation of fundamental theoretically aspects. This approach is being complemented by final graduation project where the interdisciplinary aspect is reinforced as well as consolidated student competition such as BAJA, AERODESIGN and others. The current work aims to present the CAE adoption methodology in the last two years of Mechanical Engineering course of University Sao Judas Tadeu (ANIMA group), in a way to demonstrate the employment of the tool used in the laboratory as a complement of graduation course disciplines, leading to a mature stage for the final graduation projects. The projects have used CFD (Computational Fluid Dynamics) and FEA (Finite Element Analysis). Free version of the software allows a good start for the studies, complementing the work professors are developing in the classroom.*

Keywords: *Teaching. Engineering. Numerical Simulation.*

Organização:



Realização:

